

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ОТХОДАМИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

SPECIFICITY OF THE FORMATION OF THE COMPOSITION AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TECHNOGENIC SOILS, FORMED FROM COAL PROCESSING WASTE

© 2024 В. Н. Кондакова¹, Г. Б. Поспехов²

© 2024 V. N. Kondakova¹, G. B. Pospehov²

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия В.О., д. 2,

Санкт-Петербург, 199106, Россия,

^{1,2} St. Petersburg Mining University, bld. 2, 21-st line, Saint-Petersburg, 199106, Russia

post@spmi.ru

Аннотация. Накопленные отходы переработки угля оказывают масштабное и длительное воздействие на окружающую среду, а под их складирование изымается большое количество земельных ресурсов. Однако задаче изучения формирования и изменения свойств отходов углеобогащения, складированных в насыпных отвалах, уделено недостаточно внимания. При этом учет характера техногенеза отходов углеобогащения позволяет реализовывать их безопасное и эффективное складирование, а именно установить закономерности деформирования массива на основании прогнозируемых изменений техногенных отложений. В данной публикации изложены основные факторы, определяющие генезис и характер постгенетических процессов для техногенных грунтов отвалов, формирующихся из отходов углеобогащения.

Abstract. Accumulated coal processing waste has a large-scale and long-term impact on the environment, and a large amount of land resources is being occupied by storage. However, the lack of studying the formation and changing the properties of coal processing waste stored in dumps. At the same time, taking into account the technogenesis of coal processing waste makes it possible to implement their safe and efficient storage. This publication shows the basic factors determining the genesis and nature of postgenetic processes for technogenic soils of dumps formed from coal processing waste.

Ключевые слова: техногенные отложения, отходы углеобогащения, техногенез, инженерно-геологические свойства, физико-механические свойства, гранулометрический состав, прочность на сдвиг

Keywords: technogenic soils, coal processing waste, technogenesis, geotechnical properties, mechanical properties, soil particle, shear strength

Введение

Среди всех видов горной промышленности наибольший по объёму вклад в накопление отходов вносит угольная [1,10]. К углеотходам относятся вскрышные и шахтные породы, отходы углеобогащения, угольная зола и шлаки. Все большая доля углей обогащается, что ведет к росту темпов накопления отходов, которые оказывают масштабное и длительное воздействие на окружающую среду, становятся причиной ухудшения здоровья населения в районах добычи. Под складирование изымается большое количество земельных ресурсов: до 60% площади горного отвода может быть отдано

под размещение отходов, а в случае обогатительного предприятия, в среднем, для складирования отходов требуется 2–3 тыс. га [2]. С точки зрения инженерной геологии первостепенной задачей можно считать изучение свойств техногенных отложений, что в дальнейшем позволит осуществлять недропользование наиболее рационально [5]. Более глубокое понимание свойств техногенных пород и, в частности, отходов угольной промышленности, могло бы ускорить процесс их внедрения в различные сферы производства и расширить область их применения [11]. Кроме того, внимания требует также тема взаимосвязи различных свойств, выде-

ления наиболее актуальных и ключевых, определяющих поведение пород во времени. Имеющиеся к настоящему времени экспериментальные и теоретические данные о свойствах техногенных грунтов недостаточны для прогнозирования изменений их свойств и поведения. В связи с этим темой данной работы стало выявление природных и техногенных факторов, влияющих на процесс генерации состава и свойств техногенных отложений, представленных отходами обогащения и складированных в полусухом виде в отвалах.

Особенности техногенеза отходов углеобогащения

Вопрос об изменении свойств грунтов под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека как один из основных в инженерной геологии был сформулирован ещё в 1970-х годах [3, 8]. Преобразование и появление новых типов пород, связанные с деятельностью человека, относятся к глобальному процессу литогенеза и определены А. Е. Ферсманом как техногенез. Теорию техногенеза значительно развил Н. М. Страхов, на работах которого основывались все последующие авторы, изучавшие вопросы формирования техногенных отложений [4].

В отношении отходов углеобогащения, представленных намывными отложениями гидроотвалов и хвостохранилищ, закономерности техногенеза рассматривались в работах Н. А. Кутеповой. Автором была определена роль и взаимосвязь природных и технологических факторов на различных этапах формирования техногенных грунтов из отходов углеобогащения. Так, для формирования намывных образований наибольшее значение имеет процесс фракционирования материала, происходящего при распределении пульпы по карте намыва. Кроме того, на стадии седиментогенеза проявлены процессы коагуляции дисперсных частиц, агрегирования и других процессов, протекающих при участии жидкой фазы [6,8].

Необходимость отдельного изучения процесса техногенеза «сухих» пород обусловлена спецификой материалов, слагающих намывные и насыпные сооружения, особенно проявляющейся на ранних стадиях техногенеза. Анализ работ Н. М. Страхова, А. М. Гальперина, В. Т. Трофимова, Н. А. Кутеповой и др. позволил разработать схему преобразования отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом (рис. 1). Несмотря на их схожесть в технологических приёмах и составе с намывными отложениями, схема технолитогенеза исследуемых материалов обладает своей спецификой. В связи с этим были рассмотрены этапы преобразования

отходов углеобогащения, формирующихся на одной из обогатительных фабрик, и описаны основные факторы диагенетических преобразований техногенных отложений данного типа.

В техногенезе отходов углеобогащения так же, как и в природном литогенезе осадочных пород выделяется три этапа: разрушение исходного материала, его перемещение и преобразование. Протекание этапов определяют природные и техногенные факторы. На каждом из них под воздействием физико-химических процессов изменяются состояние и свойства формирующихся техногенных грунтов.

Первый этап техногенеза заключается в мобилизации материала, а именно угля и углевмещающих пород, в результате чего определяется исходный минералогический состав отходов. Дезинтеграция вещества также происходит на обогатительной фабрике при дроблении, грохочении, флотационном и гравитационном обогащении и сушке. Также определяется начальная влажность материала, который в дальнейшем поступает в отвал. Характеристика органического вещества углей и минеральных примесей, а также петрографический состав вмещающих пород, определяют не только выбор наиболее эффективных технологических процессов добычи и обогащения, но также свойства и поведение формирующихся из отходов обогащения техногенных грунтов.

В отвал материал попадает в деформированном виде, с большим содержанием глинистой фракции и относительно высокой влажности. Второй этап технолитогенеза связан с транспортировкой отходов в отвал и их отсыпкой. На данном этапе определяющим параметром для формирования состава и свойств грунтов является выбор технологии складирования, конструктивные особенности отвала и интенсивность нагружения. В отличие от намывных отходов обогащения, складированных в сильно гидратированном виде (соотношение твёрдой и жидкой компоненты 1:10), процесс минерального фракционирования не проявлен в той же степени в отвалах «сухих» отходов углеобогащения, как и процесс седиментогенеза с образованием первичных коагуляционных структур.

Третий этап связан с диагенетическими преобразованиями, то есть уплотнением и консолидацией, происходящими вследствие ряда физико-химических процессов в теле отвала. После отсыпки происходит структурная перестройка отложений с разрушением крупных структурных элементов и агрегированием более плотных, изменение влажности, окисление углей и т.д. Конечной стадией как природного диагенеза, так и техногенеза является

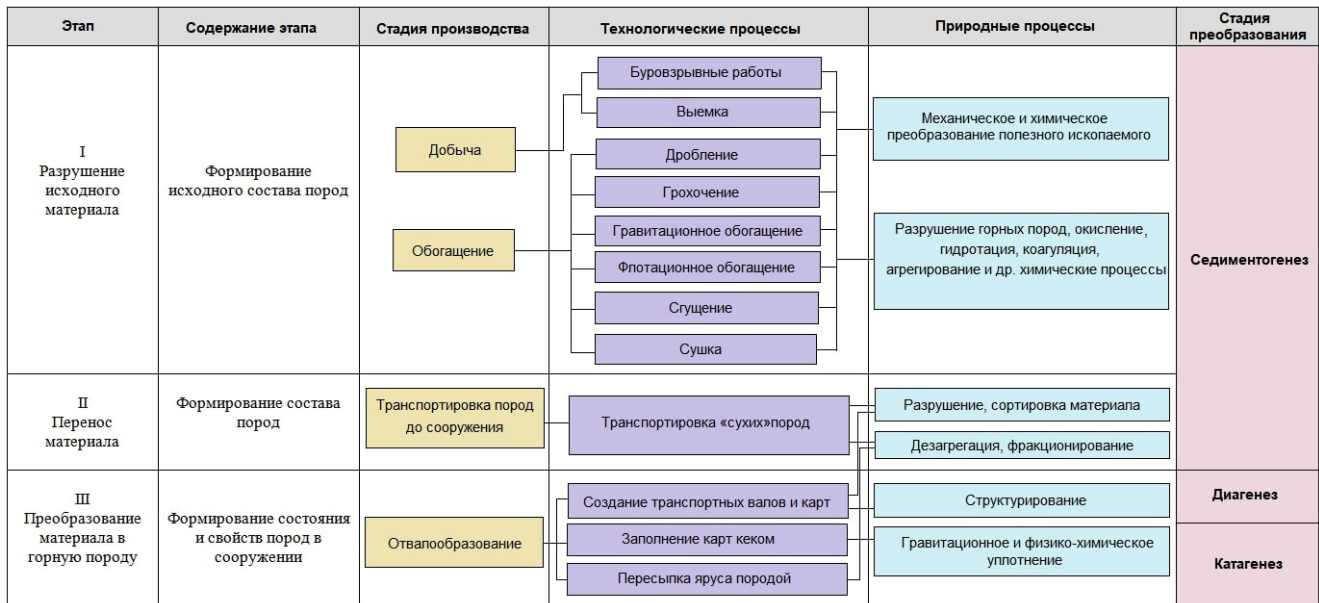


Рис. 1. Схема техногенеза отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом

литификация вещества, однако образование ближних цементационных связей происходит в течение несоизмеримо большего временного периода, чем рассматриваемый.

Из представленной схемы (рис. 1) очевидно, что протекание процессов техногенеза определяется взаимосвязанными природным и антропогенным процессами, изучение которых позволяет понять особенности свойств и поведения изучаемых техногенных грунтов.

Инженерно-геологические исследования состава и свойств отходов углеобогащения

В настоящее время активно развивается метод полусухого совместного складирования отходов флотации и грохочения, что объясняет необходимость проведения их лабораторных испытаний, а также шлаков сжигания угля и материала, отобранного на породном отвале.

Минералогический анализ отходов углеобогащения свидетельствует, что в них преобладают глинистые минералы, представленные иллитом, каолинитом и хлоритом. Из обладающих способностью к набуханию минералов в образцах присутствует только хлорит в незначительном количестве, на основании чего отходы флотации можно охарактеризовать как отложения, не склонные к набуханию. Относительно отходов данного типа описаны трудности в определении их вещественного состава, связанного с наличием сростков вещества — прочно сцепленных минеральных и органических частиц. Исследуемые углеотходы содержат в своём составе минералы, подверженные вторичным изменениям. После складирова-

ния в отвал под действием факторов химического и физического выветривания их состав может существенно меняться, а степень изменений зависит от минералого-петрографического состава, условий и времени складирования в сооружении.

Среди исследованных образцов по содержанию мелких фракций сильно выделяются отходы флотации, представляющие собой глинисто-угольный тонкодисперсный материал, средний диаметр частиц которого $d_{50}=0,05$ мм, в то время как для остальных материалов он больше 2 мм. Следует также отметить, что гранулометрический состав породы с фабрики и из существующего отвала сильно отличается, что можно объяснить физическим выветриванием складированной породы с фабрики, приводящим к дезинтеграции крупных кусков, а также действием вышележащих отходов при наращивании отвала. Следовательно, в процессе транспортирования и укладки отходов в отвал, а также в дальнейшем под действием различных факторов их зерновой состав может существенно меняться.

Результаты определения характеристик физических свойств отходов представлены в таблице 1.

Представленные результаты лабораторных испытаний (по параметру I_p) позволяют классифицировать отходы флотации как суглинок $7 < I_p < 17$. Для этих отложений были выполнены определения коэффициента фильтрации, который в среднем составил $2,6 \cdot 10^{-5}$ м/сут, что объясняется гранулометрическим составом материала, который близок к суглинистым грунтам природного происхождения. Такие значения коэффициента фильтрации означают, что в данных техногенных грунтах может

Таблица 1. Физические свойства материалов

Параметр	Единицы измерения	Материал			
		Отходы флотации	Отходы грохочения	Шлак	Отвал
Естественная влажность, W	доли ед.	0,29	0,04	0,28	0,06
Влажность на границе текучести, W_L	доли ед.	0,29			0,22
Влажность на границе раскатывания, W_p	доли ед.	0,21			0,16
Число пластичности, I_p		8			6
Показатель текучести, I_L	доли ед.	1,00			-1,67
Плотность грунта, ρ	г/см ³	1,43			2,06
Плотность скелета, ρ_d	г/см ³	1,11			1,94
Плотность частиц грунта, ρ_s	г/см ³	1,63	2,30	1,87	2,38
Коэффициент пористости, e	доли ед.	0,47			0,23
Коэффициент водонасыщения, S_r	доли ед.	1,00			0,64
Полная влагоёмкость, W_{sat}	доли ед.	0,29			0,09

возникать избыточное поровое давление, которое не успевает рассеиваться за период нагружения массива при интенсивном наращивании высоты отвала.

Параметры деформационных свойств складированных в отвалы пород и их структурной прочности определяют значения эффективных напряжений в массиве, гравитационного уплотнения, изменение пористости и характер развития порового давления, что доказано в работах Н. А. Кутеповой на примере намывных массивов отходов углеобогащения [7], в которых был описан сложный характер происходящих при уплотнении глинистых пород процессов. Очевидно, что для решения задачи прогноза поведения массива, сложенного техногенными грунтами, необходимо, в первую очередь, заниматься изучением их прочностных свойств.

Все виды отходов фабрики испытывались методом одноплоскостного среза. Результаты испытаний приведены в таблице 2. График испытаний для отходов флотации представлен на рисунке 2.

Для образцов отходов флотации проводились компрессионные испытания с целью оценки

их деформационных характеристик. Испытания отходов флотации показали следующий их разброс в диапазоне нормальных напряжений 0,1–0,2 МПа: коэффициент сжимаемости — 0,180–0,194 МПа⁻¹; одометрический модуль деформации — 7,5–8,2 МПа; компрессионный модуль деформации — 4,5–4,9 МПа. Данные значения позволяют считать отходы флотации сильносжимаемым грунтом.

Для верификации результатов испытаний на одноплоскостной срез были проведены исследования отходов флотации методом трёхосного сжатия, позволяющим учитывать влияние порового давления.

В результате испытаний по КД и КН-схемам в эффективных напряжениях параметры прочности получились близкими:

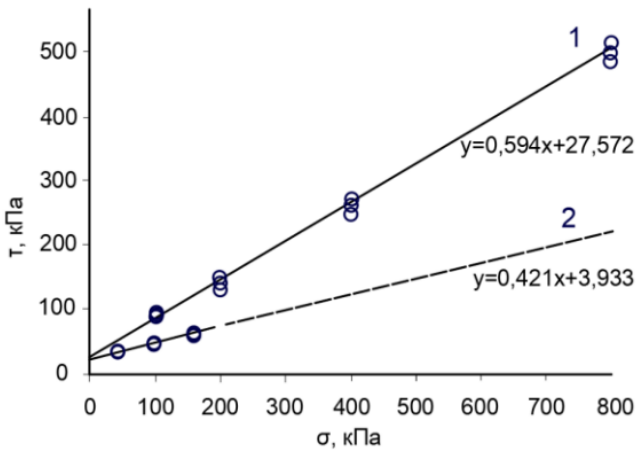


Рис. 2. Результаты испытаний отходов флотации на одноплоскостной срез: 1 — консолидированно-дренированный; 2 — неконсолидированный

Таблица 2. Прочностные параметры отходов флотации, крупнообломочных отходов и шлака в водонасыщенном состоянии по результатам испытаний на одноплоскостной срез

Показатель	Материал			
	Отходы флотации	Отходы грохочения	Шлак	Отвал
Сцепление, кПа	28	47	51	60
Угол внутреннего трения, °	31	30	32	30

- по схеме «КД» сцепление — 33 кПа, угол внутреннего трения — 31°;
- по схеме «КН» сцепление — 22 кПа, угол внутреннего трения — 32°.

По КН-схеме в полных напряжениях параметры прочности составили: сцепление — 0 кПа, угол внутреннего трения — 15°.

Более низкие значения прочности при недренированных трехосных испытаниях объясняются тем, что при одноплоскостном срезе, даже при больших скоростях среза, существует возможность отжатия воды по поверхности среза и боковой поверхности образца. По этой причине требуется учитывать величину порового давления, что обуславливает необходимость проведения трёхосных испытаний для подобных грунтов. Параметры прочности, соответственно, зависят от схемы испытания, напряженно-деформированного состояния образцов и величины порового давления. Увеличение порового давления и изменение напряжённого состояния приводит к уменьшению сцепления, значение угла внутреннего трения при этом не изменяется.

Выводы

Разработанная схема техногенеза отходов углеобогащения позволила определить и исследовать факторы влияния на процесс формирования техногенных пород, главными из которых являются начальный химический и минералогиче-

ский состав обогащаемой породы, применяемая схема обогащения, конструктивные особенности отвала, а также время. Установлено, что несмотря на отличия в начальных составах и характеристиках отходов различных предприятий, техногенные породы обладают рядом общих признаков и являются закономерно сформированными, что подтверждает теорию техногенеза. Следовательно, процесс технолитогенеза можно рассматривать как тип природного литогенеза, в результате которого формируются осадочные породы из мобилизованного, перемещённого и изменённого материала.

Было обосновано, что на этапе преобразований, происходящих до складирования отходов в отвал, происходит формирование состава и начальных свойств, которые претерпевают изменения после складирования, где основным фактором преобразований материала, оказывающим влияние на его прочностные свойства, является давление, под действием которого изменяется структура, пористость и влажность отходов.

На основании лабораторных исследований выявлены различия в свойствах и поведении изучаемого материала и природных образований. Обосновано, что при изучении свойств отходов углеобогащения, складированных селективно, основное внимание должно уделяться отходам флотации в связи с большой вероятностью развития избыточного порового давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» — текст электронный // Официальный сайт Министерства природных ресурсов РФ. — URL: <https://www.mnr.gov.ru> (дата обращения 01.07.2023).
2. Боровков Ю. А. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / Л. А. Амосов, А. В. Бурмистренко, Б. Б. Зобнин, С. И. Мормиль [и др.]. // Екатеринбург. НИА-Природа. — 2002. — 206 с.
3. Гальперин А. М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. — М.: Недра, 1988. — 197 с.
4. Гальперин А. М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, Ю. В. Кириченко [и др.] — М.: Горная книга, 2012. — 336 с.
5. Кириченко, Ю. В. Геомеханическое обеспечение учебно-рекреационной рекультивации карьеров и отвалов / Ю. В. Кириченко, В. В. Ческидов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — № 8. — С. 91–98.
6. Кутепов Ю. И. Изучение порового давления в намывных массивах / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2006. — № 2. — С. 205–215.
7. Кутепов Ю. И. Закономерности формирования порового давления при гидроотвалообразовании и отсыпке «сухих» отвалов / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова. // ГИАБ. — 2008. — № 11. — С. 212–220.
8. Кутепова Н. А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: дисс. д. техн. наук: 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» / Кутепова Надежда Андреевна. — Санкт-Петербург, 2011. — 424 с.

9. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология: инженерная петрология: учебник для вузов / В. Д. Ломтадзе. — Л.: Недра, 1984. — 511 с.
10. Таразанов, И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-июнь 2019 года / И. Г. Таразанов, Д. А. Губанов. // Уголь. — 2019. — № 12. — С. 40–48.
11. Трофимов, В. Т. Классификация техногенных воздействий на геологическую среду // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, А. С. Герасимова. — 1995. — № 5. — С. 96–107.